

วิธีการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สำหรับการควบคุมแบบ ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้น

สนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์

ไตรภพ บัวระกุด¹⁾ และ วิจิตร กิณเรศ²⁾

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอ วิธีการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน พิกัดกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลต์ 4,500 รอบต่อนาที ชนิดโรเตอร์แม่เหล็กแบบติดพื้นผิว สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ทำให้ทราบตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ละคู่เฟสก่อน จากนั้นได้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิดโดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้มอเตอร์เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นโดยใช้วงจรซีโรครอสซิง สำหรับคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง ที่เกิดขึ้นจากการวัดสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง หลังจากนั้นได้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบปิด นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการกระจายสนามแม่เหล็กจากการกระตุ้นขณะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนท์อีลิเมนต์ 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPEED ในระบบควบคุมทั้งหมดได้ถูกประมวลผลโดยใช้ dsPIC ซึ่งเป็นตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ขนาด 16 บิต

คำสำคัญ : มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน, ชนิดโรเตอร์แม่เหล็กแบบติดพื้นผิว, การควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ, แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ, ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

* ¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 Email: amd2000_1@yahoo.com

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 E-mail: kkwijit@kmitl.ac.th

A Starting Method of Brushless DC Motor for Rotor Position Sensorless Control Using a Magnetic Field Stator Winding Excited Technique

Traiphop Buarakod^{*1)} and Vijit Kinnarees²⁾

ABSTRACT

This paper presents a starting method of a 100W, 30V, 4500rpm Brushless DC (BLDC) motor with Surface Permanent Magnets (SPM) for rotor position sensorless control using a magnetic field stator winding excited technique. This technique helps starting of the brushless DC motor resulting in identifying the initial rotor position by exciting phase winding. After that, the motor is controlled in open loop operation with a 120 degree rectangular wave technique in order to generate back electromotive force (back-EMF). The back-EMF is monitored by using zero crossing. The rotor position and speed are calculated from the relation between back-EMF and zero crossing periods. Then, the motor is driven in closed loop speed control. Additionally, considering magnetic flux distribution resulting from the proposed initial stator excitation is given using 2-D Finite Element Analysis (2-D FEA) by the SPEED software package. The overall control system is processed by a 16 bit dsPIC which is a Digital Signal Controller (DSC).

Keywords: Brushless DC (BLDC) Motor, Surface Permanent Magnet (SPM), Sensorless Control, back electromotive force (back-EMF), Digital Signal Controller (DSC).

*¹⁾ Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok 10520 Email: amd2000_1@yahoo.com

²⁾ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok 10520 E-mail: kkwijit@kmitl.ac.th

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอามอเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรมาใช้กันทั่วไป อาทิเช่นในงานอุตสาหกรรมสำหรับควบคุมเครื่องจักรที่มีโหลดต่อเนื่อง เครื่องใช้ในครัวเรือน และอุตสาหกรรมการทำความเย็น ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูง ส่วนใหญ่จะควบคุมโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ และตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น [1-2], เนื่องจากงานบางประเภทมีข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เช่น มอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบปิด และงานประเภทที่มีอุณหภูมิสูง ไม่สามารถติดตั้งตัวตรวจจับได้จึงจำเป็นต้องหาวิธีการรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เริ่มต้นสำหรับการควบคุมมอเตอร์ขณะออกตัว ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เพื่อช่วยค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น เมื่อทราบ

ตำแหน่งเริ่มต้นที่แน่นอนแล้ว หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ตามตำแหน่งของโรเตอร์แบบวงรอบเปิด ด้วยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ โดยใช้วงจรซีโรครอสซิงคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์ และความเร็วรอบ

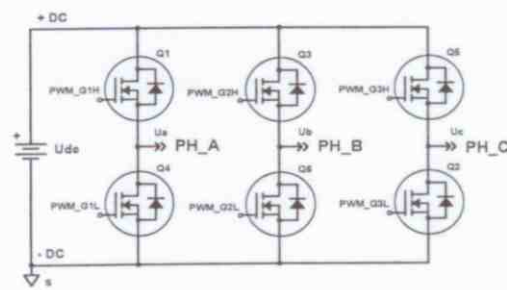
การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ลักษณะการขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ตามตารางที่ 1 เป็นสัญญาณ ขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละระดับสำหรับชุดอินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในรูปที่ 1 (ก) จะได้สัญญาณจากการขับเคลื่อนทางด้านอุดมคติ ในรูปที่ 1(ข) แต่ละเฟสแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นและมุมมองทางด้านสเตเตอร์กับสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์

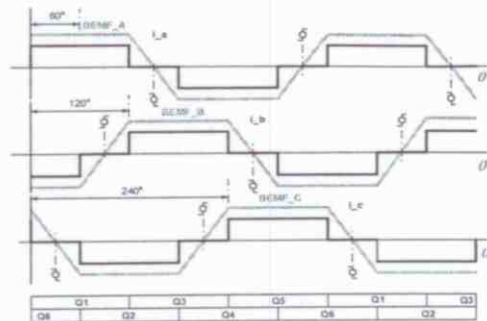
ตารางที่ 1 สัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

Sector	G 1H	G 1L	G 2H	G 2L	G 3H	G 3L	U _{as}	U _{bs}	U _{cs}
1	1	0	0	1	0	0	U _{dc} /2	-U _{dc} /2	0
2	1	0	0	0	0	1	U _{dc} /2	0	-U _{dc} /2
3	0	0	1	0	0	1	0	U _{dc} /2	-U _{dc} /2
4	0	1	1	0	0	0	-U _{dc} /2	U _{dc} /2	0
5	0	1	0	0	1	0	-U _{dc} /2	0	U _{dc} /2
6	0	0	0	1	1	0	0	-U _{dc} /2	U _{dc} /2

หมายเหตุ : "1" switch ON, "0" switch OFF



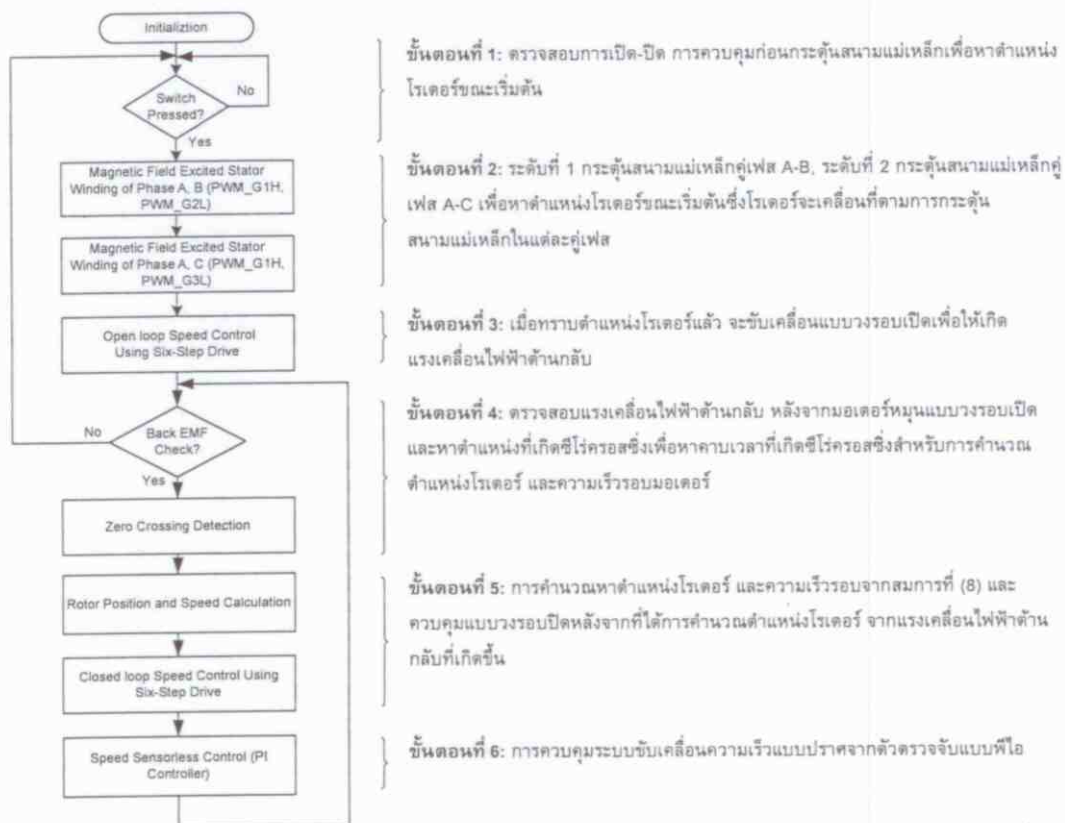
(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ชุดขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (ข) กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์

อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 2 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

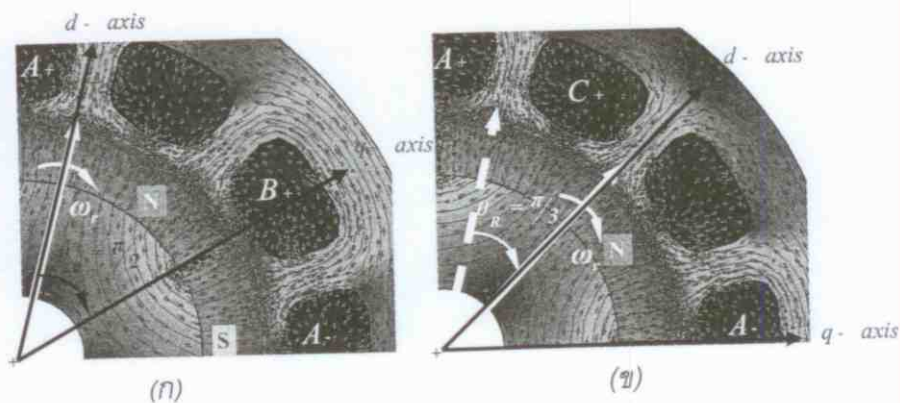
อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ในการออกตัวขณะเริ่มต้น แสดงดังในรูปที่ 2 การกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟสเพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนเพื่อใช้ในการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ เมื่อได้ตำแหน่งของโรเตอร์แล้วจะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด เพื่อให้เกิด

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่วัดโดยตรงจากแรงดันไฟฟ้าสาย และทำการเปรียบเทียบกับวงจร ซีโรครอสซิงเพื่อคำนวณหาความเร็วรอบจากคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง [4], ในแต่ละขั้นตอนดังได้แสดงเอาไว้

การกระจายเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวด

การกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์เพื่อหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ด้วยวิธีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับขดลวด ในรูปที่ 3 แสดงทิศทางการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดแต่ละคู่เฟสตามสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ในรูปที่ 3 (ก) เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B ขณะเริ่มต้นไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ตำแหน่งไหนก็ตามจะถูกกระตุ้นในระดับที่ 1 ทำให้ทราบตำแหน่งขณะเริ่มต้นของมอเตอร์ก่อน และระดับที่ 2 ใน

รูปที่ 3 (ข) เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C เพื่อให้ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนก่อนจะขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด ให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยใช้โปรแกรม SPEED และโปรแกรม 2-D FEA [8], แสดงทิศทางการของสนามแม่เหล็ก และตำแหน่งโรเตอร์เมื่อถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ในแต่ละระดับ จะเห็นว่าตำแหน่งโรเตอร์เคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกากระยะมุมที่เคลื่อนที่ 60° ตามทิศทางอ้างอิงทางโรเตอร์ (dq-axis) หรือตามสัญญาณการขับเคลื่อนแต่ละระดับ

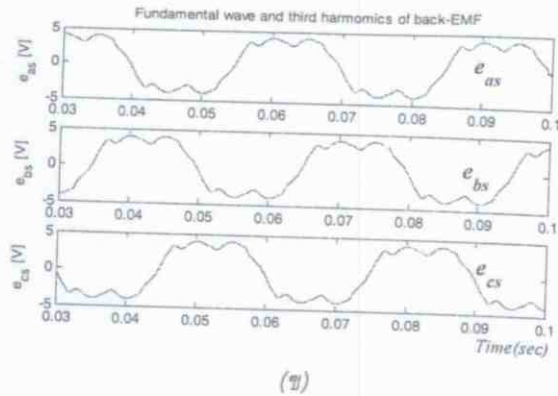
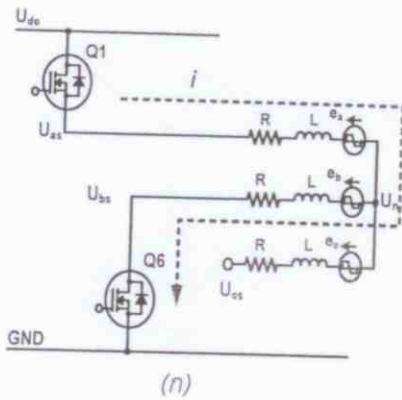


รูปที่ 3 เส้นแรงแม่เหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่โรเตอร์ และทิศทางการกระจายของสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ (ก) กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B และ (ข) กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C ตามลำดับ

การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละเฟส

ในการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับระหว่างมอเตอร์เฟสเปิดเป็นการวัดสัญญาณที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแต่ละเฟสช่วงเวลาเปิดของสวิตช์มอเตอร์เฟส [4-5], ดังนั้นการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรงจากจุดต่อแรงดันไฟฟ้าในช่วงเปิดของสวิตช์มอเตอร์เฟส ระหว่างสัญญาณขับเคลื่อนที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดแต่ละคู่เฟส หรือขณะที่มอเตอร์ทำงานในช่วงโหมด (Q1,

Q6) ปิดแสดงในรูปที่ 4 (ก) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเฟส A ไปเฟส B ในวงจรอินเวอร์เตอร์ช่วงการเปลี่ยนสวิตช์ ขณะที่มอเตอร์เฟส Q1, Q6 ทำการทำงานหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจากจุดต่อแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C เมื่อกระแสไฟฟ้าเฟส C เป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่จุด C จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นที่เฟส C ดังจะอธิบายในสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4 (ข)



รูปที่ 4 (ก) การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแต่ละเฟส

โดยพิจารณาที่เฟส A จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ในสมการที่ (1) และพิจารณาที่เฟส B จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ในสมการที่ (2) ดังนี้

$$U_n = U_{dc} - U_{mos} - Ri - L \frac{di}{dt} - e_a \quad (1)$$

$$U_n = U_{mos} + Ri + L \frac{di}{dt} - e_b \quad (2)$$

เมื่อ U_{mos} คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟส (V), U_{dc} คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V), U_n คือแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (V), e_a, e_b, e_c คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟส (V), i คือกระแสไฟฟ้า (A), R คือความต้านทานด้านสแตเตอร์ต่อเฟส (Ω) และ L คือความเหนี่ยวนำด้านสแตเตอร์ต่อเฟส (mH) จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอนเมื่อนำสมการที่ (1), (2) รวมกันจะได้สมการ U_n ใหม่ในสมการที่ (3)

$$U_n = \frac{U_{dc}}{2} - \frac{e_a + e_b}{2} \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับจุดรวมที่นิวตรอนเท่ากับศูนย์ จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C คือ $e_c = -(e_a + e_b)$ นำ e_c ไปแทนค่าในสมการที่ (3) จะได้สมการ U_n ใหม่ในสมการที่ (4) ดังนี้

$$U_n = \frac{U_{dc}}{2} + \frac{e_c}{2} \quad (4)$$

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่เฟส C จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C (e_c) รวมกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน แสดงในสมการที่ (5) และเมื่อนำสมการที่ (4) แทนค่า U_n จะได้

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c + \frac{U_{dc}}{2} \quad (5)$$

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c \quad (6)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้า ($U_{dc}/2$) เป็นจุดอ้างอิงสำหรับตรวจสอบตำแหน่งซีโรครอสซิง ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C ในสมการที่ (6) จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C (e_c) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวงจรซีโรครอสซิง ในการคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งหลักการดังกล่าวมาจะใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัลตระกูล dsPIC ขนาด 16 บิต [6-7], และในรูปที่ 5 (ก) แสดงกล่องควบคุมและการคำนวณความเร็วรอบจากสัญญาณคาบเวลาซีโรครอสซิง (T_A) ในรูปที่ 5 (ข) แสดงสัญญาณซีโรครอสซิง จากการเปรียบเทียบสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับกับจุดแรงดันอ้างอิง จะได้สัญญาณคาบเวลาซีโรครอสซิง ในสมการที่ (7) จากเวลาเปิด-ปิดของออปแอมป์ จะสังเกตเห็นว่าการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันที่จุดอ้างอิงกับแรงเคลื่อนจะได้คาบเวลาเป็นสองเท่าของเวลาเปิดออปแอมป์ และนำคาบเวลามาคำนวณความเร็วรอบ (ω_r) ในสมการที่ (8) ตัวอย่างการคำนวณความเร็วรอบ ที่ความเร็วคำสั่ง (ω_r^*) 2,500 รอบต่อวินาที คาบเวลาที่ได้จากการเปรียบเทียบ (T_A) 12.75 มิลลิวินาที จำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) 4 ขั้ว และความเร็วรอบผิดพลาด (e_r) ได้จากความเร็วรอบคำสั่งลบกับความเร็วรอบคำนวณ (ω_r) ในสมการที่ (9) ดังนี้

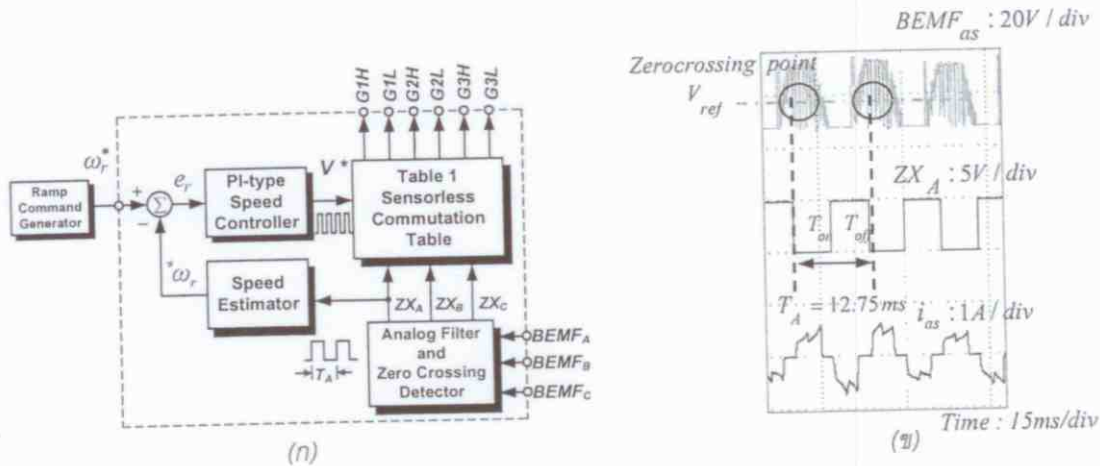
$$T_A = T_{on} + T_{off} = 2T_{on} = 12.75 \text{ ms} \quad (7)$$

ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_r &= \frac{1}{T_A} \times \frac{60}{(P/2)} = \frac{120}{PT_A} \\ &= \frac{120}{(4)(12.75 \times 10^{-3})} = 2,353 \text{ rpm}\end{aligned}\quad (8)$$

จะให้ความเร็วรอบคำนวณ ($\hat{\omega}_r$) 2,353 รอบต่อวินาที ดังนั้นความเร็วรอบผิดพลาด (e_r) จะได้

$$\begin{aligned}e_r &= (\omega_r^* - \hat{\omega}_r) \\ &= 2,500 - 2,353 = 147 \text{ rpm}\end{aligned}\quad (9)$$



รูปที่ 5 (ก) การคำนวณความเร็วจากคาบเวลาจากการเกิดซีโรครอสซิง และ (ข) การตรวจสอบสัญญาณ

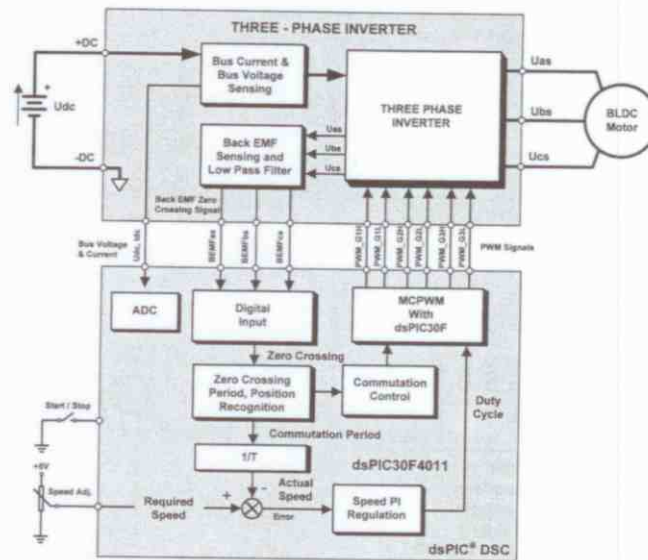
ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราคจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

ในตารางที่ 2 แสดงตัวแปรของมอเตอร์และข้อกำหนดสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ ในรูปที่ 6 แสดงไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งชุดอินเวอร์เตอร์ วงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ วงจรตรวจจับ

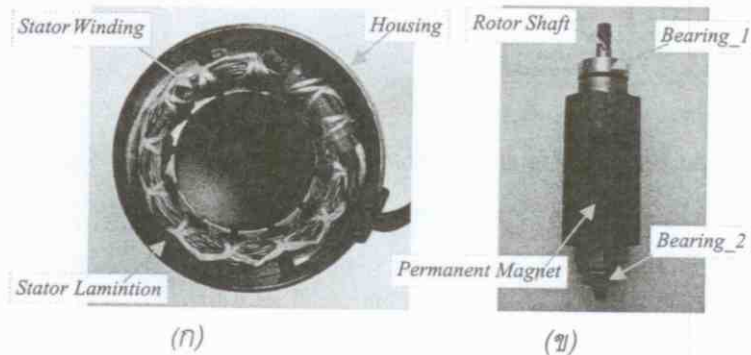
แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า [5], ส่วนที่สองเป็นชุดควบคุมระบบใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล (DSC) dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ของบริษัท Microchip [6-7], เป็นอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และส่วนที่สามมอเตอร์แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ในรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดในการควบคุมและตัวแปรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

Motor Characteristics	Motor Type :	3 PHASE, Brushless DC Motor
	Rate Motor Spec.:	100 W, 30 V, 1.2A, 4 Poles
	Resistance (R_s) / Inductance (L_s) :	1 Ω / 1mH
	EMF Constant (K_e) :	0.13 V/(rad/sec)
	Rotor Inertial (J) :	0.12 kg.cm.s ²
Drive Characteristics	Max. speed range :	4,500 RPM
	Max. DC-bus voltage (U_{dc}) :	50 V
	Frequency switching (f_{PWM}) :	20 KHz.
	Speed Controller :	PI - Control
	Protection :	Over current, voltage fault protection.



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

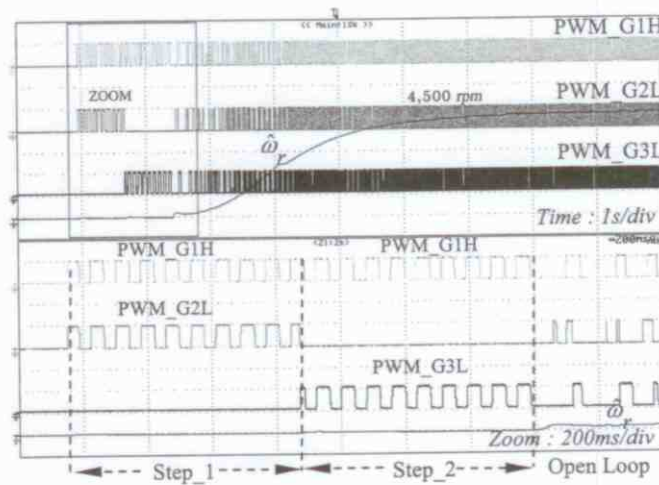


รูปที่ 7 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (ก) สเตเตอร์ (ข) โรเตอร์แม่เหล็กถาวร

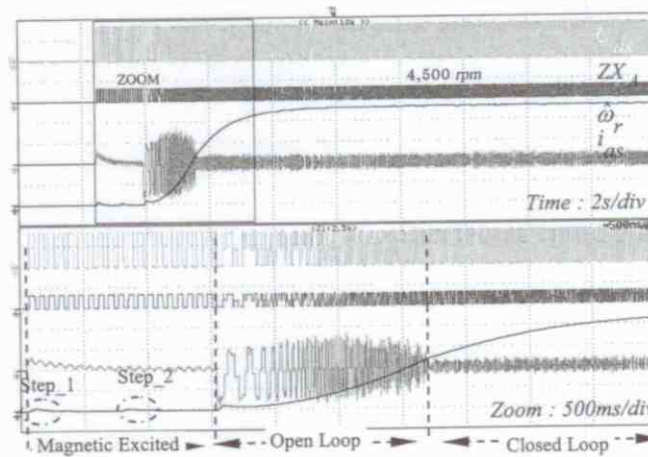
ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในรูปที่ 8 แสดงสัญญาณขับเคลื่อนและความเร็วรอบขณะออกตัวเริ่มต้นจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดโดยระดับที่ 1 (Step 1) เป็นการกระตุ้นที่คู่เฟส A-B เพื่อหาตำแหน่งขณะเริ่มต้นของโรเตอร์ไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ตำแหน่งไหนก็ตาม จะถูกสนามแม่เหล็กคู่เฟส A-B ยึดตำแหน่งของโรเตอร์เอาไว้ในสถานะแรก และระดับที่ 2 (Step 2) จะกระตุ้นคู่เฟส A-C เพื่อให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ที่แน่นอนเมื่อทราบตำแหน่งเริ่มต้นของมอเตอร์แล้วจะทำการส่งสัญญาณขับเคลื่อนตามตำแหน่งโรเตอร์แบบวงรอบเปิด เพื่อทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และทำการตรวจจับสัญญาณแรงเคลื่อนเพื่อใช้เปรียบเทียบกับแรงดันจุดอ้างอิงสำหรับหาคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง ในการคำนวณหาความเร็ว

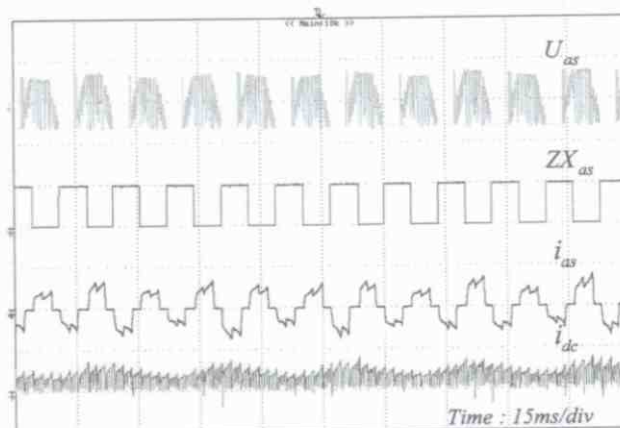
รอบมอเตอร์ ส่วนในรูปที่ 9 แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าสายสัญญาณซีโรครอสซิง กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบขณะออกตัวเริ่มต้นในช่วงกระตุ้นสนามแม่เหล็กจนถึงการขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด และขับเคลื่อนแบบวงรอบปิด จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าช่วงกระตุ้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A นั่นคงที่ เมื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์จะขับเคลื่อนมอเตอร์ตามตำแหน่งโรเตอร์ ช่วงวงรอบเปิดกระแสไฟฟ้าจะสูง เนื่องจากจะต้องใช้แรงบิดขณะออกตัวเริ่มต้น และจะลดลงเมื่อถึงความเร็วพิกัดที่ 4,500 รอบต่อนาที ส่วนในรูปที่ 10 เป็นลักษณะของสัญญาณที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟส A ตำแหน่งการเกิดซีโรครอสซิงที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้าเฟส และกระแสไฟฟ้าตรง



รูปที่ 8 สัญญาณขับเคลื่อน PWM_G1H (5V/div) สัญญาณขับเคลื่อน PWM_G2L (5V/div) สัญญาณขับเคลื่อน PWM_G3L (5V/div) และความเร็วรอบ (ω_r : 1000 rpm/div) ขณะออกตัวเริ่มต้น



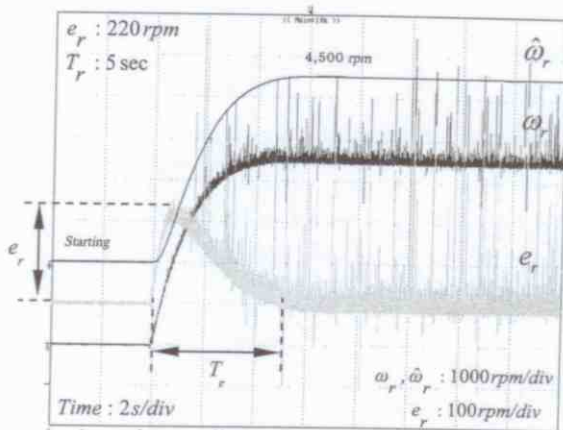
รูปที่ 9 แรงเคลื่อนไฟฟ้า (U_{as} : 20V/div) ตำแหน่งของโรเตอร์ (ZX_A : 10V/div) กระแสทางด้านสเตเตอร์ (i_{as} : 1A/div) และความเร็วรอบ (ω_r : 1,000 rpm/div)



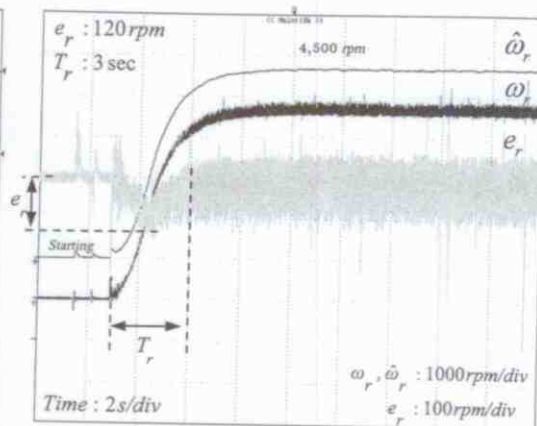
รูปที่ 10 แรงเคลื่อนไฟฟ้า (U_{as} : 20V/div) ตำแหน่งของโรเตอร์ (ZX_A : 5V/div) กระแสทางด้านสเตเตอร์ (i_{as} : 1A/div) และกระแสไฟตรง (i_{dc} : 1A/div) ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อวินาที

ผลการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะเริ่มต้น ระหว่างการควบคุมโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ในรูปที่ 11 (ก) และการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ที่นำเสนอ ในรูปที่ 11 (ข) ผลการทดสอบความเร็วรอบขณะเริ่มต้นถึงความเร็วพิกัด มอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับมีความเร็วผิดพลาด

($\hat{e}_r = \omega_r - \hat{\omega}_r$) และระยะเวลาเข้าสู่ความเร็วพิกัด (T_r) มากกว่าเนื่องจากการออกตัวเริ่มต้นแบบทันทีทันใดนั้น จะทำให้ความเร็วผิดพลาดขณะออกตัวนั้นมากกว่า ดังนั้น การทราบตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์จึงมีส่วนสำคัญ ในการขับเคลื่อนสัญญาณให้สัมพันธ์กับตำแหน่งโรเตอร์ จะช่วยลดความเร็วผิดพลาดขณะเริ่มต้นได้ดีกว่า การออกตัวแบบทันทีทันใดแสดงในผลการทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 เปรียบเทียบการควบคุมความเร็วขณะเริ่มต้น (ก) แบบใช้ตัวตรวจจับ และ (ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบออกตัวเริ่มต้นโดยใช้เทคนิคที่นำเสนอ สำหรับระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ขณะออกตัวเริ่มต้นที่นำเสนอนี้ช่วยลดความเร็วรอบผิดพลาดขณะเริ่มต้น (45.45%) ได้จากผลการทดสอบเนื่องจากการทราบตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น และขับเคลื่อนสัญญาณให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ไม่ว่าตำแหน่งของโรเตอร์จะอยู่ตำแหน่งไหนก็ตามจะถูกยึดด้วยสนามแม่เหล็กที่กระตุ้นระดับแรกก่อน และระดับที่สองเพื่อให้ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโรเตอร์ก่อนจะขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งโรเตอร์ สำหรับคำนวณหาความเร็วรอบในระบบควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

สามารถนำเทคนิคที่นำเสนอมานำใช้งานประเภทความคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เช่น มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ชนิดแบบปิด เนื่องจากข้อจำกัด

เรื่องการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับในขณะที่มีโหลดสารทำความเย็นอยู่ในระบบการทำงานได้

เอกสารอ้างอิง

- JR Hendershot, TJE Miller. 1994. Design of brushless Permanent Magnet Motor. Oxford University Press, Monographs in Electrical and Electronic Engineering No. 37.
- TJE Miller. 2006. SPEED Electric Motors. University of Glasgow in Electrical and Electronic Engineering.
- John Chiasson. 2005. Modeling and High - Performance Control of Electric Machines. IEEE Press series on power engineering. John Wiley & Sons.

- Dae-kyong Kim, Kwang-woon Lee, et al. 2006. A Novel Starting Method of the SPM-type BLDC Motors without Position Sensor for Reciprocating Compressor. IEEE Transaction, pp. 861-865.
- H.C. Chen, Y.C. Chang and C.K. Huang. 2007. Practical Sensorless Control for Inverter-fed BDCM Compressors. IET Elect. Power Appl., vol.1, No.1, pp.127-132.
- Microchip Technology Inc. 2007. MPLAB Available from www.microchip.com
- Microchip Technology Inc. 2007. dsPIC30F4011 Available from www.microchip.com
- SPEED Consortium. 2008. PC-BDC User's Manual. University of Glasgow in Electrical and Electronic Engineering.